

การประยุกต์ใช้อิมพัลส์แรงดันสูงสำหรับกระตุ้นผลผลิตเห็ด

Stimulation of Mushroom Production Using High-Voltage Impulses

ไตรรัตน์ ปะที^{1*} ภูรินทร์ ผัดดี²

^{1,2}สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา trp_off@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาการกระตุ้นการเจริญเติบโตของเห็ดโดยอิมพัลส์ไฟฟ้า สร้างวงจร Cockcroft-Walton ก่อนป้อนเข้าสู่วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบหลายขั้น เพื่อต้องการได้แรงดันสูงสุด 100 kV แรงดันอิมพัลส์นี้ถูกใช้กระตุ้นก้อนเชื้อเห็ดด้วยการปล่อยสปาร์กผ่านวัสดุเพาะเห็ด ผลการทดสอบพบว่ากลุ่มก้อนเชื้อเห็ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วยอิมพัลส์ไฟฟ้าให้ดอกเห็ดที่มีความยาวและน้ำหนักเฉลี่ยมากกว่าอย่างชัดเจน โดยเฉพาะเห็ดหูหนู ปริมาณผลผลิตมากกว่าก้อนเชื้อที่ไม่ได้รับการกระตุ้นกว่าเท่าตัว เทคนิคการกระตุ้นด้วยอิมพัลส์แรงสูงมีศักยภาพต่อการประยุกต์ใช้กับเห็ดสายพันธุ์อื่นที่มีมูลค่าสูง เพื่อเพิ่มผลผลิตและความคุ้มค่าในเชิงพาณิชย์

คำสำคัญ: อิมพัลส์แบบหลายขั้น กระตุ้น เห็ด

Abstract

This research focuses on developing a method to stimulate mushroom growth using high-voltage electrical impulses. A Cockcroft-Walton voltage multiplier circuit was constructed and connected to a multi-stage impulse generator to achieve a maximum voltage of 100 kV. This impulse voltage was applied to mushroom spawn blocks by discharging sparks through the cultivation medium. The test results revealed that mushroom spawn blocks stimulated with electrical impulses produced fruiting bodies with significantly greater average length and weight compared to the unstimulated group. In particular, wood ear mushrooms yielded more than twice the production of the control samples. The high-voltage impulse stimulation technique demonstrates strong potential for application to other high-value mushroom species to enhance yield and improve commercial profitability.

Keywords: multi-stage impulse, Stimulation, Mushroom

1. บทนำ

มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในการช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตรวมถึงการกระตุ้นการออกของเชื้อเห็ดด้วยกันอยู่หลายวิธี จากรายงานการศึกษาทั้งในประเทศและต่างประเทศ พบว่า

สนามไฟฟ้ามีส่วนช่วยในการกระตุ้นเปอร์เซ็นต์การออกและการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิด โดยสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงกระทำกับอนุภาคที่มีประจุภายในเมล็ดพืช ซึ่งภายในเมล็ดพืชนั้นมีประจุอยู่มากมาย ทั้งประจุบวกและประจุลบ เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าประจุบวกภายในเมล็ดพืชจะเคลื่อนที่เข้าหาทิศทางของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดประจุลบ และประจุลบภายในเมล็ดพืชจะเคลื่อนที่เข้าหาทิศทางของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดประจุบวก ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนและทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาเคมีภายในเมล็ดพืช ทั้งนี้ยังส่งผลต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืชอีกด้วย [1-3,7] แม้ว่าการใช้ไฟฟ้าแรงสูงในกระบวนการทางการเกษตร เช่น การยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้ หรือการกำจัดจุลินทรีย์ในอาหาร จะมีการศึกษามากมายแพร่หลาย แต่การประยุกต์ใช้ไฟฟ้าแรงสูงเพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตของเห็ดยังคงเป็นหัวข้อที่มีข้อมูลวิจัยจำกัด โดยเฉพาะในแง่ของการหาความเหมาะสมของไฟฟ้าที่เหมาะสม ระดับแรงดัน รูปแบบคลื่น ความถี่ และระยะเวลาการกระตุ้น เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดโดยไม่ทำลายโครงสร้างของเส้นใยเห็ด

ในทางวิทยาศาสตร์กล่าวได้ว่าการใช้สนามไฟฟ้าแรงสูงเพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตของเห็ดมีแนวคิดและกลไกที่น่าสนใจดังนี้

- 1) การเพิ่มการดูดซึมสารอาหาร สนามไฟฟ้าอาจช่วยปรับปรุงการเคลื่อนที่ของไอออนในสารอาหารและน้ำในอุปกรณ์เพาะปลูก ซึ่งทำให้เชื้อเห็ดดูดซึมสารอาหารได้ดียิ่งขึ้น
- 2) กระตุ้นการแบ่งเซลล์ สนามไฟฟ้าสามารถกระตุ้นการแบ่งเซลล์ในเชื้อเห็ด ซึ่งช่วยให้เจริญเติบโตได้เร็วขึ้น
- 3) การเพิ่มการสังเคราะห์โปรตีน สนามไฟฟ้าอาจมีผลกระตุ้นการสังเคราะห์โปรตีนภายในเซลล์ ซึ่งจำเป็นต่อการเจริญเติบโตและพัฒนาการของเชื้อเห็ด
- 4) การกระตุ้นกระบวนการเมตาบอลิซึม สนามไฟฟ้าอาจช่วยเพิ่มอัตราการเผาผลาญในเซลล์ ส่งผลให้มีพลังงานที่มากขึ้นสำหรับการเจริญเติบโต
- 5) การปรับปรุงโครงสร้างเซลล์ สนามไฟฟ้าอาจมีผลต่อการสร้างและการจัดเรียงของโครงสร้างเซลล์ ทำให้เชื้อเห็ดมีความแข็งแรงและทนทานมากขึ้น [6,7]

สอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ศึกษาเปรียบเทียบกับกรอกของเมล็ดพืชที่ถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า โดยวัดเปอร์เซ็นต์การออกและเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่กระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า พบว่าเมล็ดพืชที่กระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้ามีเปอร์เซ็นต์การออกสูงกว่าเมล็ดพืชที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า [6]

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

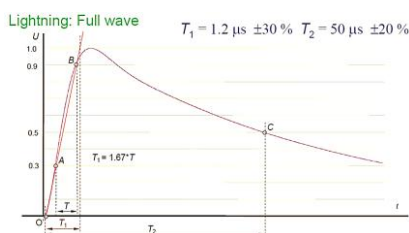
การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและทดสอบระบบไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถใช้กระตุ้นการเจริญเติบโตของเห็ด ศึกษาผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าต่อการเจริญเติบโตและปริมาณผลผลิต และสร้างความเข้าใจเชิงวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับกลไกการตอบสนองของเส้นใยเห็ดต่อสนามไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งอาจนำไปสู่การพัฒนากระบวนการเพาะเห็ดเชิงอุตสาหกรรมที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนมากขึ้น

2. การออกแบบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

2.1 การสร้างแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์ เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกิน เสิร์จหรือฟ้าผ่า ที่เกิดจากเหตุภายนอกที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า สำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานถูกกำหนดด้วยข้อกำหนดต่อไปนี้ [4-5]

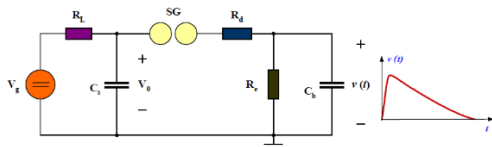
- 1) ขนาดของแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่คลื่นระลอกซ้อนที่เกิดจากออสซิลเลชันใกล้เคียง รูปคลื่น ให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก
- 2) ขั้วของแรงดันอาจจะเป็นบวกหรือลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน
- 3) เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด
- 4) เวลาช่วงหลังคลื่น T_2 หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด



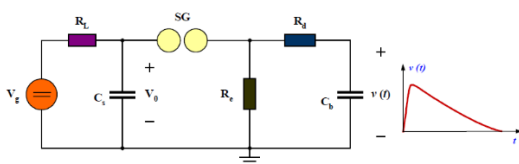
รูปที่ 1 สัญญาณรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

2.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ [4]

วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามี 2 แบบ ดังในรูปที่ 2 ก. และ รูปที่ 2 ข.



ก. วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์วงจร A



ข. วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์วงจร B

รูปที่ 2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์ก เมื่อกำหนดระยะห่างช่องสปาร์ก แกบ อาจแตกต่างกันไปบ้างแต่ไม่มากนัก ประมาณน้อยกว่า 1% ถ้าหากอากาศสะอาดปราศจากฝุ่นละออง ช่วงระยะเวลาระหว่างการเกิดสปาร์กต่อเนื่องจะถี่หรือห่าง ขึ้นอยู่กับแรงดันกระแสตรงที่ป้อนให้กับ C_s ถ้าปรับ V_0 ให้สูงมากขึ้น ก็จะเกิดสปาร์กง่าย หรือสปาร์กถี่ขึ้น เมื่อเกิดสปาร์กที่ SG แรงดันอัดประจุ V_0 จะคร่อม R_d และ C_b ประจุจะถ่ายเทไปยังวัสดุทดสอบ ซึ่งแทนด้วย C_b การถ่ายเทหรือปล่อยประจุนี้ จะเร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับ R_d และ C_b นับเป็นเวลาช่วงหน้าคลื่น ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่า R_d และ C_b นี้จะเป็นตัวกำหนดเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 เมื่อถ่ายประจุให้ C_b จนเต็มที่แล้ว ประจุนี้ก็จะดีสชาร์จ หรือปล่อยประจุออกไปสู่ R_e จึงกล่าวได้ว่า R_e ทำหน้าที่ควบคุมเวลาช่วงหางคลื่น T_2 คือ ถ้า R_e มีค่าสูง T_2 ก็จะมีค่ามากตามไปด้วย (ค่าคงตัวเวลาคายประจุ วงจร A เท่ากับ $C_s (R_d + R_e)$ และ วงจร B เท่ากับ C_s, R_e) [5] ในงานวิจัยนี้ออกแบบแรงดันอิมพัลส์ 100 kV จากการอ้างอิงงานวิจัยเรื่องอิทธิพลของการกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์ต่อการเจริญเติบโตของเส้นใยในอาหารเลี้ยงเชื้อด้วยเห็ด ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ [6,7]

ค่ายอดแรงดันที่จ่ายออกที่ปลายแรงสูง V_{max} จะน้อยกว่าแรงดันอัดประจุ V_0 เพราะประจุจะกระจายให้กับ C_s และ C_b ฉะนั้นอัตราส่วนของ V_{max} ต่อ V_0 จะน้อยกว่า 1 เสมอ และเรียกอัตราส่วนนี้เป็นประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ นั่นคือ

$$\eta = \frac{V_p}{V_0} \leq \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad (1)$$

ในทางปฏิบัติสำหรับการออกแบบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องเลือกค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเก็บพลังงาน (C_s) ให้มีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบ (C_b) หลายเท่า (ควรมากกว่า 10 เท่า) จากนั้นคำนวณค่าความต้านทานปรับเวลาหน้าคลื่น (R_d) และความต้านทานปรับเวลาหางคลื่น (R_e)

พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ W_e เป็นลักษณะสำคัญประการหนึ่ง ที่จะต้องกำหนดซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้า C_s และแรงดันอัดประจุ V_0 จะคำนวณได้จาก

$$W_e = \frac{1}{2} C_s V_0^2 \quad (2)$$

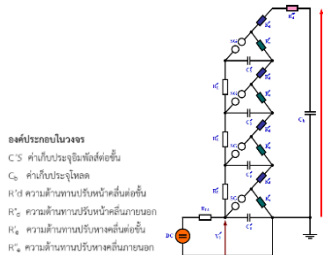
2.3 วงจร Cockcroft-Walton

ประกอบด้วยชุดของไดโอดและตัวเก็บประจุที่ต่อเรียงกันเป็นวงจรแบบเรียงซ้อน เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามา วงจรจะทำงานในลักษณะที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะถูกชาร์จประจุไฟฟ้าทีละตัว เมื่อวงจรทำงานไปเรื่อยๆ แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแต่ละตัวเก็บประจุจะถูกรวมเข้าด้วยกัน ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าสูงขึ้นกว่าแรงดันไฟฟ้าอินพุต ในทางปฏิบัติมีข้อเสียหลายประการ เมื่อจำนวนชั้นเพิ่มขึ้น แรงดันไฟฟ้าของชั้นที่สูงขึ้นจะเริ่มลดลง ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากความต้านทานไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในชั้นที่ต่ำกว่า และเมื่อจ่ายกระแสเอาต์พุต แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อจำนวนชั้นเพิ่มขึ้นสามารถ

แก้ไขได้ด้วยตัวกรองเอาต์พุต แต่จำเป็นต้องใช้ตัวเก็บประจุหลายตัวเพื่อทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง

2.4 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น

จากวงจรพื้นฐานของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ในรูปที่ 2 หากต้องการแรงดันอิมพัลส์สูงๆ อาจสร้างได้ด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้น โดยใช้วงจรการจัดเรียงคอนเดนเซอร์จำนวนหนึ่งถูกชาร์จแบบขนานผ่านความต้านทานโอห์มมิกสูง แล้วคายประจุผ่านช่องว่างประกายไฟมีวงจรหลายชั้นตอนที่ใช้งานอยู่หลายแบบตามหลักการของวงจรมาร์กซ์ (Marx's circuit) [4] ดังในรูปที่ 4



รูปที่ 3 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้น

ความสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลา $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ T_1/T_2 เป็นตัวแสดงถึงรูปลักษณะของรูปคลื่น ค่า T_1 และ T_2 หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\therefore \frac{1}{\alpha_1} \approx R_c(C_s + C_b) = 9000 \times (5000 + 2000) \times 10^{-12} = 67.5 \mu s$$

$$\frac{1}{\alpha_2} \approx R_d \frac{C_s C_b}{C_s + C_b} = 403 \Omega \frac{(5000 \times 10^{-12}) \times (2000 \times 10^{-12})}{(5000 \times 10^{-12}) + (2000 \times 10^{-12})} = 403 \mu s$$

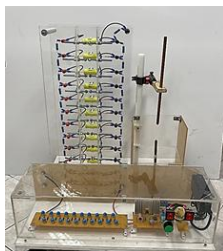
ดังนั้นจะได้ค่าเวลาแสดงถึงรูปลักษณะของรูปคลื่น

$$T_1 = K_2 \frac{1}{\alpha_2} \approx 2.96 \times (403 \times 10^{-9}) \cdot T_2 = K_1 \frac{1}{\alpha_1} \approx 0.73 \times 67.5 \times 10^{-9}$$

$$\text{รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ } T_1 / T_2 \approx 1.19 / 49.27 \mu s$$

3. การออกแบบชุดสปาร์ก

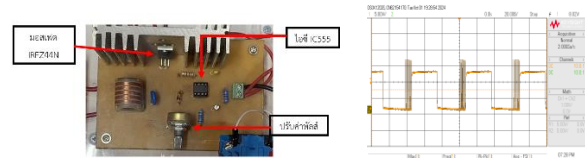
ในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดปลายแหลม จะทำให้ประจุมีความหนาแน่นบริเวณปลายแหลมและทำให้มีความเข้มของสนามไฟฟ้าบริเวณปลายแหลม เป็นวิธีการสร้างโคโรนาดีสชาร์จโดยไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความแรงดันสูงบริเวณปลายแหลม เพื่อสร้างประจุบวกและไอออนลบ



รูปที่ 4 ชุดกระตุ้นก่อนเชื้อเห็ดด้วยแรงดันอิมพัลส์

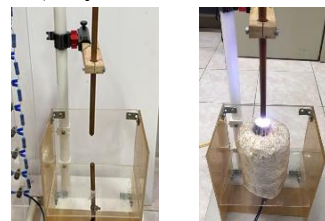
4. การทดสอบ

1) การทดสอบวงจร โดยการจำลองค่าในโปรแกรมคอมพิวเตอร์และวัดค่าโดยออสซิลโลสโคป Keysight ที่วัดค่าความกว้างของพัลส์และวัดแรงดันพัลส์ใช้ตัวโวลต์จติไวเตอร์ลดทอนแรงดัน

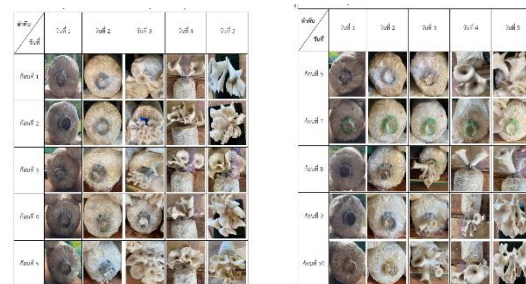


รูปที่ 5 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์และสัญญาณพัลส์จากวงจร

2) การกระตุ้นเชื้อเห็ดก่อนโดยการสปาร์กอิมพัลส์ไฟฟ้าผ่านก่อนเชื้อเห็ดโดยตรง ขั้วไฟฟ้าบวกและลบของแท่นกระตุ้นก่อนเชื้อเห็ดที่ทำการสปาร์กนั้นเป็นโลหะตัวนำไฟฟ้าที่ทำจากทองแดง โดยระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากับก่อนเชื้อเห็ด 5 เซนติเมตร ผ่านไมดูลรีเลย์หน่วงเวลาให้สปาร์กก่อนเชื้อเห็ด 10 ครั้ง/ก่อน ทำการทดลองเห็ด 3 ชนิด แบ่งกลุ่มทดลอง 2 แบบคือแบบกระตุ้นเห็ดและแบบไม่กระตุ้นเห็ด ภายใต้การควบคุมในโรงเรือนเพาะที่อุณหภูมิ 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 75%

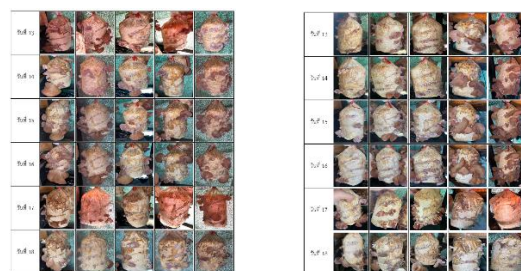


รูปที่ 6 ชุดอิเล็กทรอนิกส์ปลายแหลมสำหรับการกระตุ้นเชื้อเห็ด



ก. ผลการเติบโตเห็ดด้วยอิมพัลส์แรงสูง ข. ผลการเติบโตเห็ดแบบปกติ

รูปที่ 7 ตัวอย่างการเจริญเติบโตของเห็ดนางรมเทา



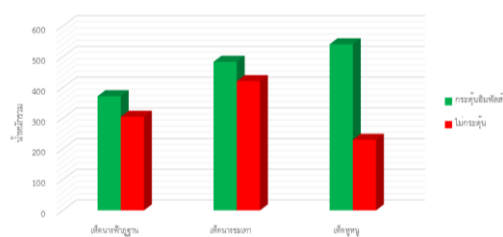
ก. ผลการเติบโตเห็ดด้วยอิมพัลส์แรงสูง ข. ผลการเติบโตเห็ดด้วยปกติ

รูปที่ 8 ตัวอย่างการเจริญเติบโตของเห็ดหูหนู

จากตารางที่ 1 การเปรียบเทียบโดยเฉลี่ยในการทดลองจำนวน 3 ครั้งของเห็ด 3 ชนิด จะเห็นว่าผลผลิตจากก้อนเชื้อเห็ดที่กระตุ้นด้วยอิมพัลส์ไฟฟ้า มีน้ำหนักมากกว่าก้อนเชื้อเห็ดที่ไม่ได้กระตุ้น ในการชั่งน้ำหนักรวมพบว่าสามารถเพิ่มผลผลิตเห็ดนางฟ้าภูฐานขึ้น~21.31% เห็ดนางรมเทา~15.04% และเห็ดหูหนูเพิ่มผลผลิตขึ้น~134.35% (แบบมีนัยสำคัญ) และในงานวิจัยนี้เห็ดเห็ดหูหนูจะตอบสนองผลจากการกระตุ้นมากที่สุด ในการทดสอบนี้คาดหวังผลทดสอบกับเห็ดหูหนู เนื่องจากจะขยายผลวิจัยไปสู่การเพาะเลี้ยงแบบอินทรีย์(Oragnic) เพื่อนำเห็ดเข้าสู่กระบวนการทำผลิตภัณฑ์เห็ดอบแห้ง

ตารางที่ 1 ข้อมูลน้ำหนักผลผลิตเห็ดที่ทดสอบในงานวิจัยเฉลี่ย

ตัวอย่าง ก้อนเห็ด	กระตุ้นเชื้อเห็ดด้วยอิมพัลส์ไฟฟ้า			แบบไม่กระตุ้น(ตามธรรมชาติ)		
	เห็ด นางฟ้า ภูฐาน	เห็ด นางรม เทา	เห็ด หูหนู	เห็ด นางฟ้า ภูฐาน	เห็ด นางรม เทา	เห็ด หูหนู
1	85	68	103	30	72	40
2	80	100	96	89	84	41
3	43	90	119	75	102	41
4	83	104	113	37	124	43
5	80	122	110	74	39	65
$\bar{X}$	74.2	96.8	108.2	61	84.2	46
SD	17.57	19.83	8.93	25.91	31.99	10.68
น้ำหนักรวม	372	484	541	305	421	230



รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบผลผลิตเห็ดในงานวิจัย

5. สรุปผล

อิมพัลส์ไฟฟ้าแรงสูงในงานวิจัยนี้ ออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันสูงออกมาได้ค่า 1kV เพื่อจ่ายให้กับวงจร Cockcroft Walton ให้ได้แรงดัน 10kV และจ่ายต่อไปให้วงจร Marx Generator เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุต 100kV แต่ในการวัดแรงดันอิมพัลส์จริงได้ 97.31 kV และผลผลิตจากเห็ดที่ถูกกระตุ้นจะได้ผลผลิตมากกว่าเห็ดที่ไม่ได้รับกระตุ้น สนามไฟฟ้าแรงสูงเพื่อใช้กระตุ้นพลังงานที่ทำการคำนวณอยู่ในระดับ 7.5 จูล อาจน้อยเกินไปสำหรับก้อนเชื้อเห็ดหรือจากปัจจัยอื่นๆ กลุ่มตัวอย่างผลผลิตเห็ดหูหนูที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าแรงสูงนั้น พบว่าเพิ่มขึ้นแบบมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ได้กล่าวอ้างถึงนั้น ก้อนเชื้อเห็ดที่ถูกสนามไฟฟ้าแรงสูงจะสามารถเพิ่มผลผลิตของได้ดี ควรนำไปประยุกต์ใช้ทดลองกับเห็ดสายพันธุ์ที่มีมูลค่าทางการตลาดสูงหรือเห็ดพื้นถิ่น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน ที่สนับสนุนสถานที่ทำงาน รวมถึงเครื่องมือในการทำวิจัย(ห้องวิจัย PER. Lab of RMUTL)

เอกสารอ้างอิง

- [1] นิรุทธิ์ จันธิมา สาลินี อาจารย์ และ ดุสิต งามรุ่งโรจน์, “การพัฒนาชุดทดลองกระตุ้นผลผลิตก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าโดยใช้พัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูง,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 29, ฉบับที่ 3, ก.ค.-ก.ย. 2562. หน้า 495-506
- [2] ชิตชนก มากจันทร์, “การศึกษาการกระตุ้นเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งด้วยเทคนิคสนามไฟฟ้าร่วมกับน้ำผสมโอโซน” วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ปีที่ 13(2) , 2564, หน้า 467-483.
- [3] ณัฏฐา จันทรโสม ญัฐวดี สุวรรณทา และ วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล, “การกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กถาวรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของถั่วงอก”วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ,การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5, 2556, หน้า 26-33.
- [4] Kuffel, E., Zaengl, W.S. and Kuffel, J. “High Voltage Engineering: Fundamentals.” 2nd ed. Newnes, Great Britain.2000.
- [5] Koichi Takaki, Kohei Yoshida, Tatsuya Saito, Tomohiro Kusaka, Ryo Yamaguchi, Kyusuke Takahashi, and Yuichi Sakamoto. “Effect of Electrical Stimulation on Fruit Body Formation in Cultivating Mushrooms,” *Proceeding of Microorganisms*. 2014 Mar; 2(1): Published online Febuary 2014 12. pp. 58-72.
- [6] S. Tsukamoto, H. Kudoh, S. Ohga, K. Yamamoto, and H. Akiyama, “Development of an automatic electrical stimulator for mushroom sawdust bottle,” *Proceeding of the 15th IEEE international Pulse Power Conference*, 2005, pp. 1437-1440
- [7] Neo E. Nyakane. “The Effects of Magnetic Fields on Plants Growth: A Comprehensive Review,” *Proceeding of International Journal of Food Engineering*, Vol. 5, No. 1, March 2019. Pp. 79-87.



ไตรรัตน์ ปะทิ ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำหลักสูตร วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน มีความสนใจงานวิจัยด้านไฟฟ้าแรงสูงและสมรรถกริต